

# Les matériaux composites

## *Références*

### Chapitre 14 “*Des Matériaux*”

13-1

## Plan

---

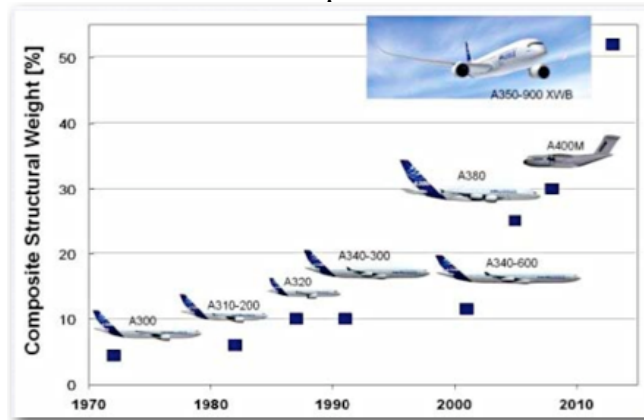
- **Introduction**
- Définitions
- Classification
- Composites renforcés par particules
- Composites renforcés par fibres
- Exemples : composites à matrices polymériques, métalliques ou céramiques

13-2

## Pourquoi les composites ?

- **Métaux** : tenaces et ductiles mais masse volumique généralement élevée.
- **Plastiques** : légers mais faible rigidité et propriétés mécaniques moyennes.
- **Céramiques** : module d'Young et résistance à la traction élevés mais fragiles.
- ➔ **Composites** = combinaison de matériaux non-miscibles donnant des propriétés totalement différentes de celles des composants de base.

*Généralement,  
l'objectif est de  
réduire la masse tout  
en gardant au moins  
les mêmes  
performances  
mécaniques.*



[www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=165](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=165)

13-3

## Pourquoi les composites ?

- Métaux** : tenaces et ductiles mais masse volumique généralement élevée.
- Plastiques** : légers mais faible rigidité et propriétés mécaniques moyennes.
- Céramiques** : module d'Young et résistance à la traction élevés mais fragiles.
- ➔ **Composites** = combinaison de matériaux non-miscibles donnant des propriétés totalement différentes de celles des composants de base.

- CMP : amélioration de la faible rigidité des plastiques;
- CMM : amélioration des matrices d'Al et de Mg;
- CMC : amélioration de la tenacité des céramiques.

13-4

Tableau 14.1 Rigidités spécifiques de quelques matériaux

*Métaux*

*Polymères*

$\frac{E}{\rho}$  Faible

*Céramiques*

$\frac{E}{\rho}$  ↑

| Matériau                       | Masse volumique (t/m <sup>3</sup> ) | Module d'Young (GPa) | Rigidité spécifique |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|
| Aluminium                      | 2,7                                 | 71                   | 26,3                |
| Bore                           | 2,63                                | 400                  | 152                 |
| Béryllium                      | 1,8                                 | 315                  | 175                 |
| Magnésium                      | 1,74                                | 42                   | 24,1                |
| Titane                         | 4,51                                | 120                  | 26,6                |
| Acier                          | 7,8                                 | 210                  | 26,9                |
| Tungstène                      | 19,3                                | 411                  | 21,3                |
| Zirconium                      | 6,49                                | 94                   | 14,5                |
| Polyéthylène                   | 0,93                                | 0,2                  | 0,2                 |
| Polycarbonate                  | 1,30                                | 2,4                  | 1,8                 |
| Polyépoxyde                    | 1,30                                | 2,4                  | 1,8                 |
| Polyester                      | 1,35                                | 5                    | 3,7                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,0                                 | 500                  | 125                 |
| AlN                            | 3,3                                 | 350                  | 106                 |
| SiC                            | 3,2                                 | 700                  | 218,8               |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | 3,1                                 | 380                  | 122,6               |
| BeO                            | 3,0                                 | 357                  | 119                 |
| Bois (pin spica)               | 0,39                                | 13                   | 33,3                |

$\frac{E}{\rho}$

Combiner les céramiques et les métaux pour améliorer la rigidité spécifique du matériau

13-5

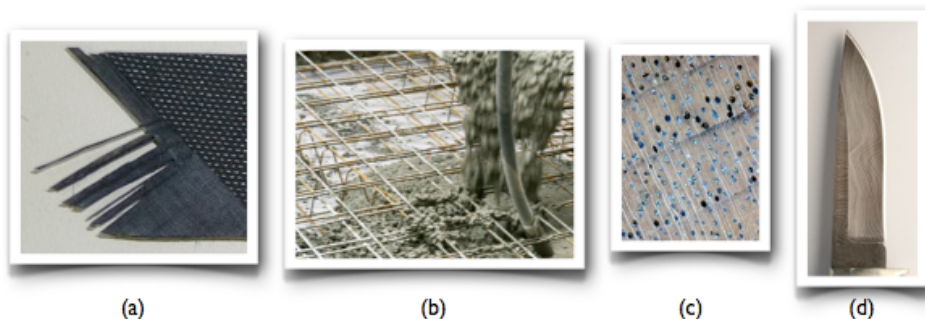
## Plan

- Introduction
- Définitions
- Classification
- Composites renforcés par particules
- Composites renforcés par fibres
- Exemples : composites à matrices polymériques, métalliques ou céramiques

13-6

## Définition et classification

- Matériau hétérogène contenant **au moins deux** constituants.
- Constituants disposés selon l'organisation géométrique qui confèrera au composite des propriétés supérieures à celles des constituants pris séparément. **Renfort**
- **Matrice** (donne la cohésion) et renfort qui assure la tenue mécanique.

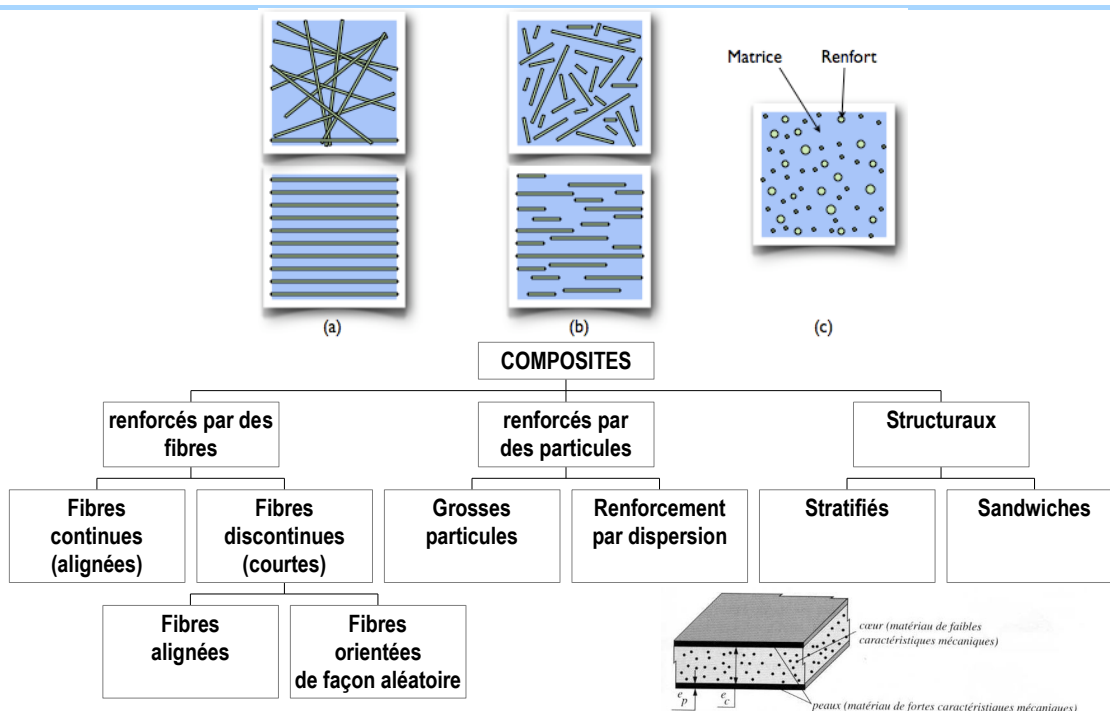


Exemples de multi-matériaux : (a) un composite carbone/époxy, (b) un béton armé, (c) du bois vu au microscope optique, (d) une lame d'acier de Damas (image de Ralf Pfeifer).

[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=165](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=165)

13-7

## Définition et classification



[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=165](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=165)

13-8



# Exemples



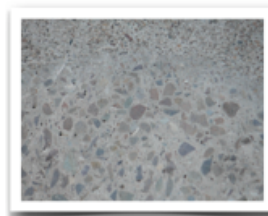
(a)



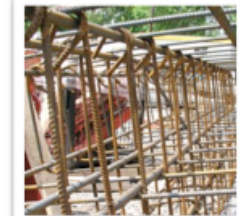
(b)



(c)



(a)

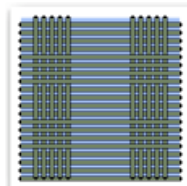


(b)

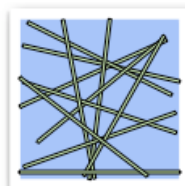
[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=165](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=165)

13-9

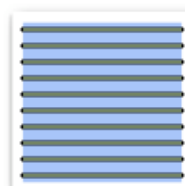
# Exemples



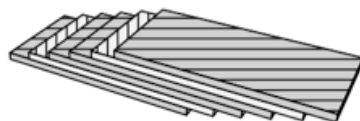
(a)



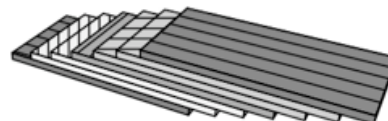
(b)



(c)



(a)  $[-45/45/-45/-45/45/-45]$



(b)  $[0/45/45/90/-45/-45/0]$

[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=165](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=165)

13-10

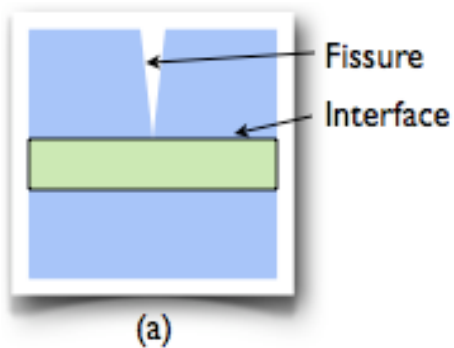
# Exemples



[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=165](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=165)

13-11

## Pourquoi les composites?

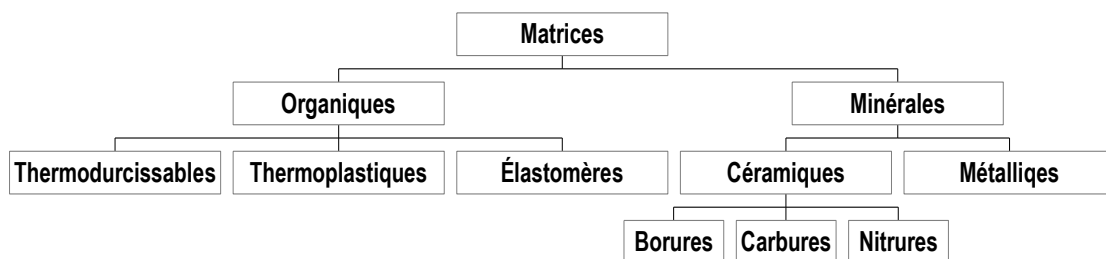


[http://www.si.ens-cachan.fr/accueil\\_V2.php?page=affiche\\_ressource&id=165](http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=165)

13-12

# Les matrices

- Rôles :
  - Assure le transfert des contraintes au renfort,
  - Incorpore les fibres (fabrication facile et à faible coût).
- Caractéristiques :
  - Forte adhésion avec les renforts,
  - Faible rigidité.
- Types de matrice :



13-13

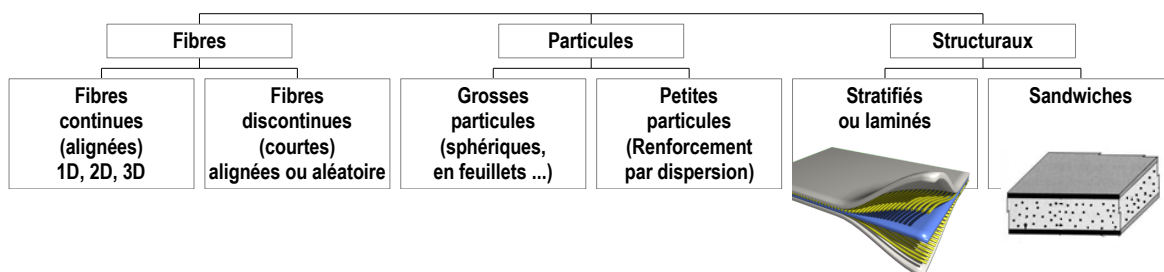
# Les renforts

## Objectifs

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites.

## Caractéristiques

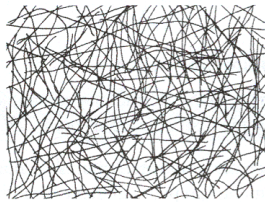
- **Nature** du renfort
  - organique : polymère (Kevlar...), végétal (bois, coton, papier...)
  - céramique/minérale : verre, carbone, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mica, amiante
  - Métallique : acier, bore, béryllium
- **Forme et structure** du renfort



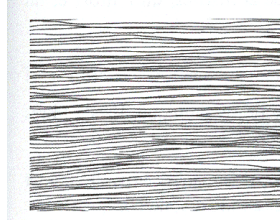
13-14

# Les renforts fibreux

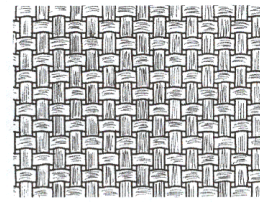
Fibres courtes  
orientées de façon  
aléatoire : mat



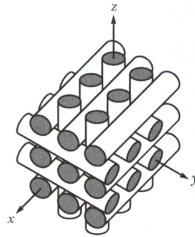
Fibres longues  
alignées :  
unidirectionnel



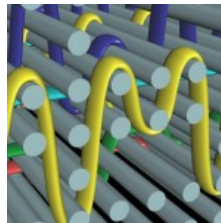
Tissage 2D :  
bidirectionnel  
(tricot ou tressage)



En développement :  
structures 3D

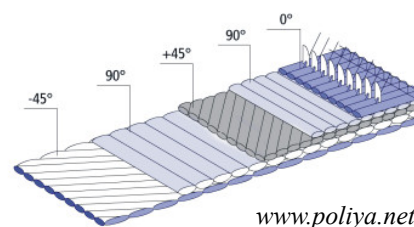


Tissage 3D



[www.scotweave.com](http://www.scotweave.com)

Structures NCS



[www.poliya.net](http://www.poliya.net)

**13-15**

## Plan

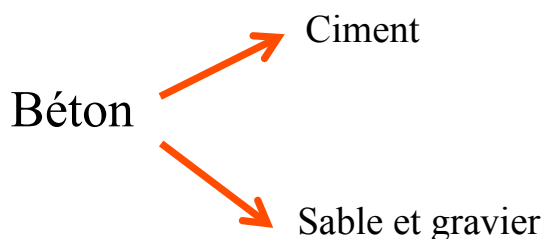
- Introduction
- Définitions
- Classification
- **Composites renforcés par particules**
- Composites renforcés par fibres
- Exemples : composites à matrices polymériques, métalliques ou céramiques

## Composites renforcés par des particules

- Grosses particules : les propriétés relèvent de la mécanique classique. Les particules sont plus dures et plus rigides que la matrice.
- Petites particules : dispersions de 10 à 100 nm. Renforcement à l'échelle atomique ou moléculaire.

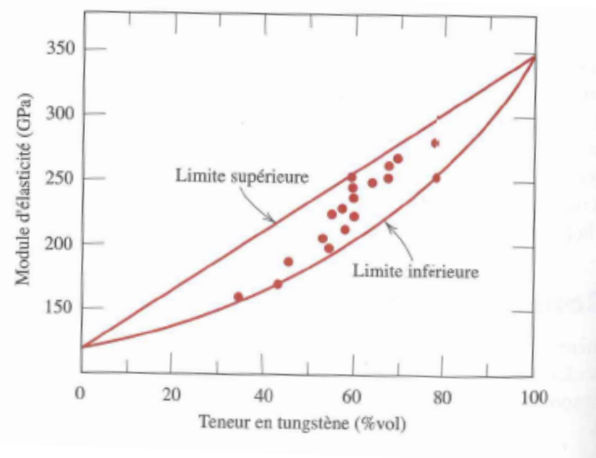
13-17

## Composites renforcés par des particules Béton



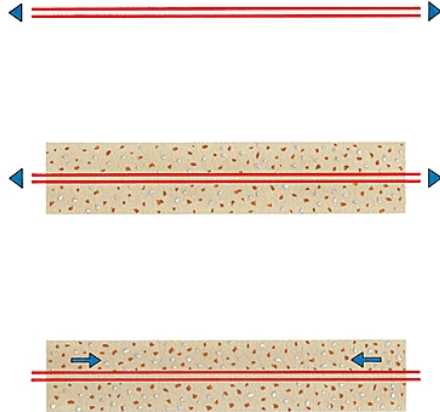
$$\sup E_c = E_m V_m + E_p V_p$$

$$\inf E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$$



# Amélioration de la ténacité par mise en compression du matériau

## Exemple : le béton précontraint

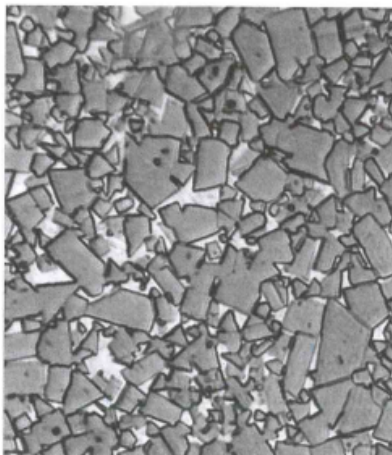


*Le principe du béton précontraint consiste à armer un béton d'aciers très fortement tendus qui, mettant en compression le béton, confèrent à l'ensemble des caractéristiques particulières de résistance et d'élasticité.*

13-19

## Cermets

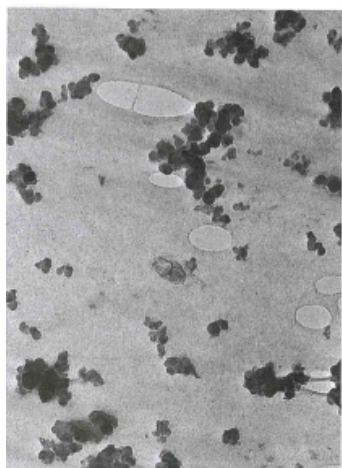
- Particules de WC, TiC;
- Matrice de Cobalt;
- Outils d'usinages d'acier durs;
- Particules de carbures donnent du tranchant mais sont fragiles;
- Matériaux plus tenace;
- La matrice est aussi choisie pour supporter les hautes températures que l'on a lors de l'usinage.



**FIGURE 17.4** Micrographie d'un échantillon de WC-Co, un carbure cimenté. La matrice de cobalt apparaît en pâle. Les parties foncées correspondent à des particules de carbure de tungstène. Facteur d'agrandissement : 100.

Micrographie fournie gracieusement par Carbopol Systems Department, General Electric Company.

# Les élastomères pour pneu



- Noir de C;
- 15 à 30 % en volume;
- Particule de 20 à 50 nm;
- Amélioration de la résistance à l'abrasion, lacération.

**FIGURE 17.5** Micrographie obtenue par microscopie électronique d'un échantillon de caoutchouc synthétique servant à fabriquer la bande de roulement d'un pneu. On y observe facilement les particules sphéroïdales de noir de carbone. Les zones lenticulaires correspondent à de petites bulles d'air. Facteur d'agrandissement : 80 000.

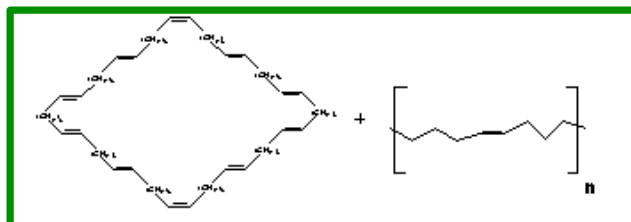
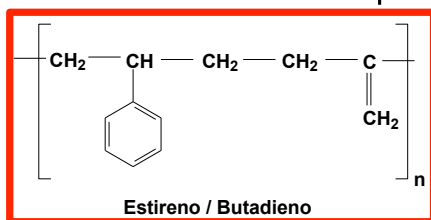
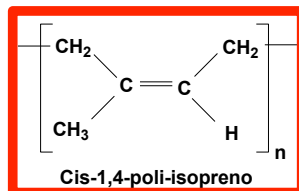
Micrographie fournie gracieusement par la Goodyear Tire & Rubber Company.

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

13-21

## Mélanges de polymères : applications mélange d'élastomères

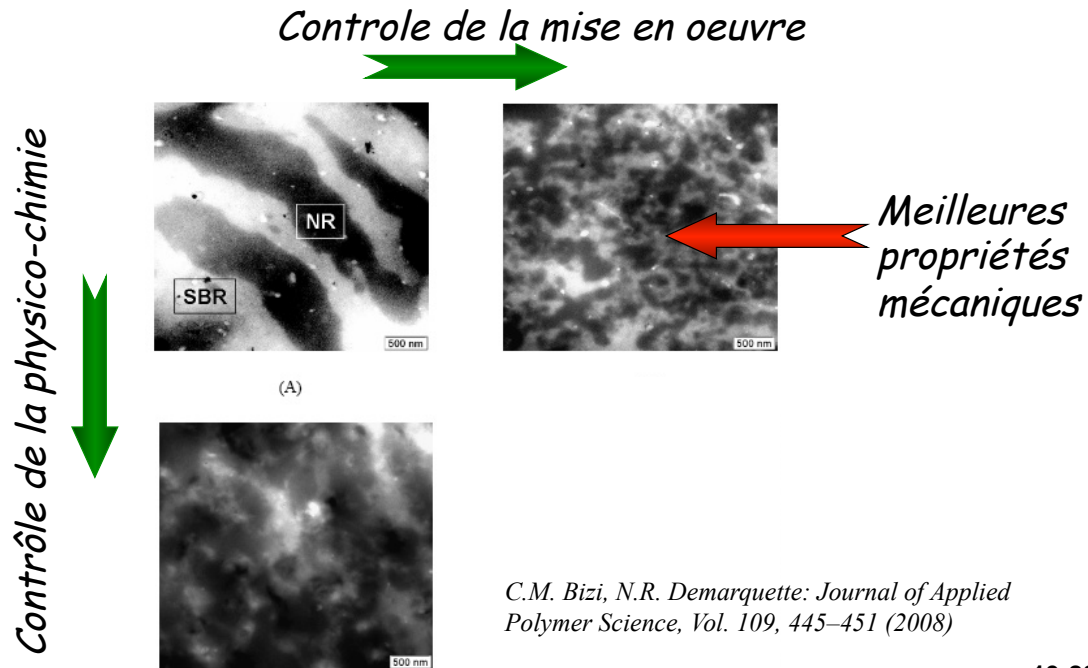
## Composants normaux des pneus



### Optimisation des conditions de mise en oeuvre et de l'ajout de compatibilisant



## Mélanges de polymères : applications mélange d'élastomères



13-23

## Plan

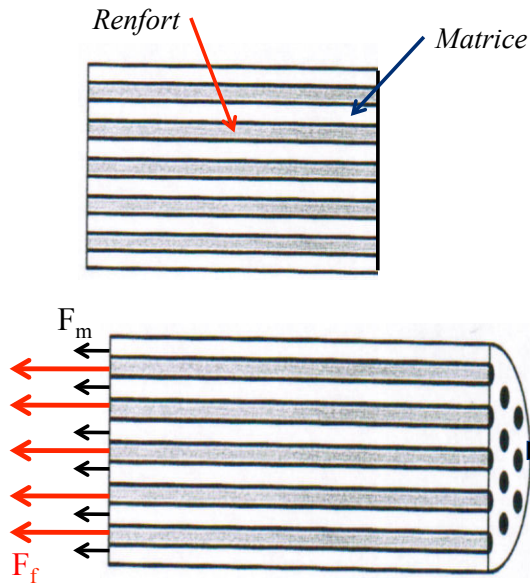
- Introduction
- Définitions
- Classification
- Composites renforcés par particules
- **Composites renforcés par fibres**
- Exemples : composites à matrices polymériques, métalliques ou céramiques

13-24



# Propriétés mécaniques

Cas d'un chargement **longitudinal** (dans la même direction que les fibres) :



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Loi des mélanges

$$F_c = F_f + F_m$$

$$\sigma_f = \frac{F_f}{S_f}, \sigma_m = \frac{F_m}{S_m} \text{ et } \sigma_c = \frac{F_c}{S_c}$$

$$\Rightarrow \sigma_c = \frac{F_f + F_m}{S_c} = \sigma_f \frac{S_f}{S_c} + \sigma_m \frac{S_m}{S_c}$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_f = E_f \varepsilon_f \\ \sigma_m = E_m \varepsilon_m \\ \sigma_c = E_c \varepsilon_c \end{array} \right\} \Rightarrow \text{loi de Hooke}$$

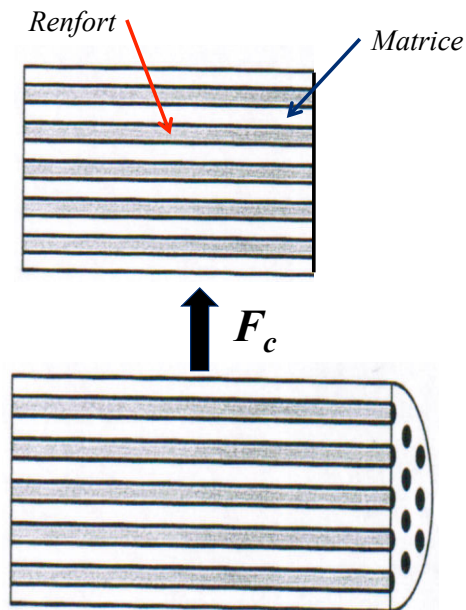
$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f$$

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f = E_m (1 - V_f) + E_f V_f$$

13-25

# Propriétés mécaniques

Cas d'un chargement **transversal** (perpendiculaire à la direction des fibres) :



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Loi des mélanges

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m = \sigma \Rightarrow \text{état d'isocontrainte}$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m$$

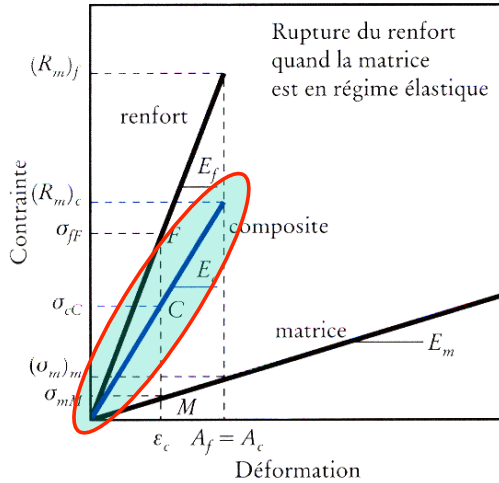
$$\left. \begin{array}{l} \sigma_f = E_f \varepsilon_f \\ \sigma_m = E_m \varepsilon_m \\ \sigma_c = E_c \varepsilon_c \end{array} \right\} \Rightarrow \text{loi de Hooke}$$

$$\frac{\sigma}{E_{ct}} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f$$

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m}$$

13-26

# Courbe $\sigma - \epsilon$ des composites



**Cas #1 : le renfort et la matrice ont un comportement fragile (purement élastique)**

$$\text{Loi des mélanges : } \sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

## a) Matrice et renfort fragiles

Pour une déformation donnée :

$$\alpha_c = V_f \alpha_f + (1 - V_f) \alpha_m$$

Loi de Hooke appliquée aux composants :

$$\alpha_f = E_f \epsilon_f ; \alpha_m = E_m \epsilon_m ; \alpha_c = E_c \epsilon_c$$

Égalité des déformations :  $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$

Module d'Young  $E_c$  du composite :

$$E_c = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

Résistance à la traction  $R_{mC}$  du composite :

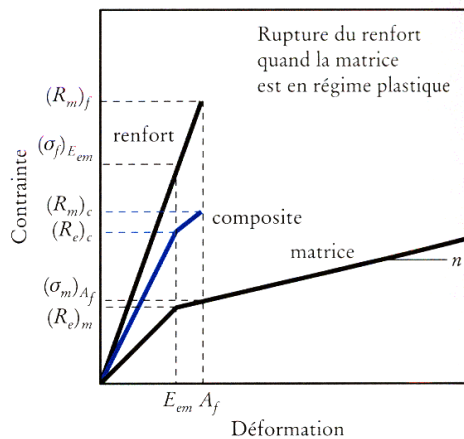
$$R_{mC} = V_f R_{mf} + (1 - V_f) \alpha_m$$

$\alpha_m$  = contrainte dans la matrice à l'instant de la rupture du renfort

$$R_{mC} = V_f R_{mf} + (1 - V_f) E_m A_f$$

13-27

# Courbe $\sigma - \epsilon$ des composites



$$\sigma_c = V_f \cdot \sigma_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m$$

$$(R_m)_c = V_f \cdot (R_m)_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m$$

$$\text{On a : } \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m \\ \epsilon_f = \frac{(R_m)_f}{E_f} \\ \sigma_m = E_m \epsilon_m = E_m \epsilon_f \end{array} \right\} \Rightarrow \sigma_m = \frac{(R_m)_f}{E_f} \cdot E_m$$

$$(R_m)_c = V_f \cdot (R_m)_f + (1 - V_f) \cdot \frac{(R_m)_f}{E_f} \cdot E_m$$

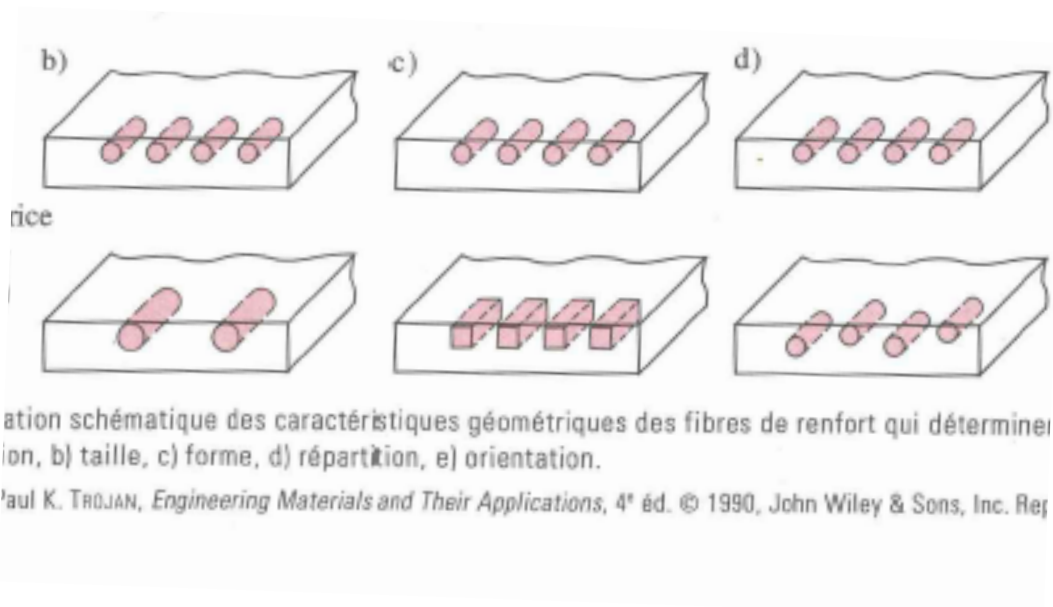
$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f$$

**Cas #2 : La matrice a un comportement ductile (déformation plastique)**

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-28

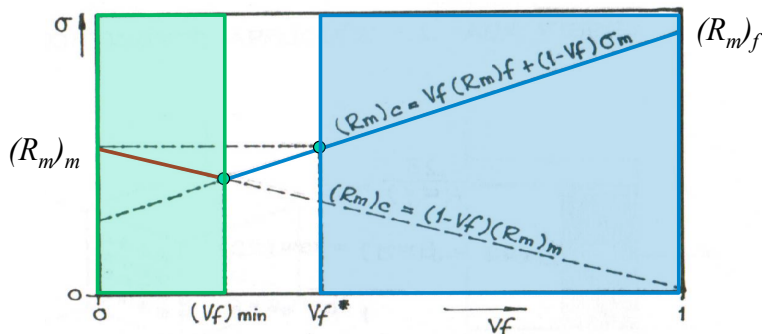
# Composites renforcés par des fibres



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister

13-29

## Fraction critique de fibre $V_f$



Fraction critique de fibre ( $V_f$ )\* : taux de fibres à partir duquel il y a renforcement du matériau :  $(R_m)_c > (R_m)_m$  (Zone en bleu) => effet bénéfique du renfort pour la résistance mécanique.

$$(R_m)_c = V_f (R_m)_f + (1 - V_f) \sigma_m \text{ et } V_f^* = \frac{(R_m)_m - \sigma_m}{(R_m)_f - \sigma_m}$$

Fraction minimale de fibre ( $V_f$ )<sub>min</sub> : taux de fibre en dessous duquel, il se produit une rupture des fibres (Zone en vert) => le renfort ne transmet plus les contraintes et donc seule la matrice supporte ses contraintes.

$$(R_m)_c = (1 - V_f) (R_m)_m \text{ et } V_{f \min} = \frac{(R_m)_m - \sigma_m}{(R_m)_f + (R_m)_m - \sigma_m}$$

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-30

## Effet de la longueur des fibres

Il existe donc une longueur minimale de longueur des fibres donnée par

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$

$\tau_c$  : plus petite des deux grandeurs suivantes: résistance de liaison fibre-matrice ou limite d'élasticité en cisaillement de la matrice.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-31

## Influence de l'orientation ( $\alpha$ ) des fibres

- *Les propriétés mécaniques :*
  - $E$  et  $R_m = f(\alpha, \sigma_{appliquée})$ .
- *Les composites unidirectionnels sont anisotropes;*
- *Fibres orientées de façon aléatoire :*
  - *emploi de structures composites à mat (orientation aléatoire),*
  - *emploi des composites avec alternance des couches unidirectionnelle.*

$$E_c = \frac{3}{8} V_f E_f + V_m E_m$$

$$(R_m)_c = k \cdot V_f (R_m)_f + V_m \sigma_m$$

$k = 3/8$  si la loi des mélanges est respectée.

$\Sigma_m$  : contrainte dans la matrice au moment de la rupture des fibres.

13-32

## Influence de l'orientation ( $\alpha$ ) des fibres

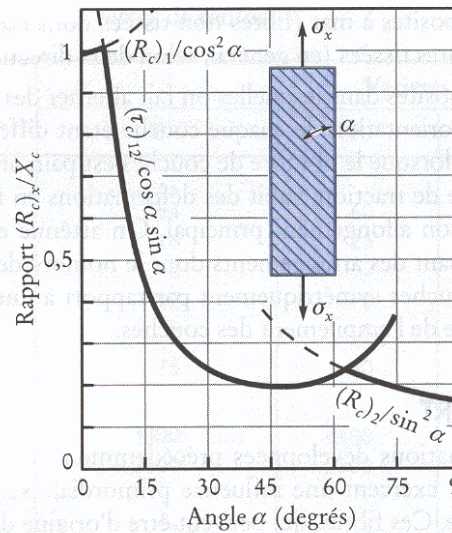
Si  $0 < \alpha < 90^\circ$

Le matériau est alors

soumis :

- $\sigma$  selon la direction 1;
- $\sigma$  selon la direction 2;
- $\tau$  selon le plan 12.

$(R_c)_1$  et  $(R_c)_2$   
résistance du  
composite dans les  
directions principales



Résistance à la traction  
selon une direction  $x$   
formant un angle  $\alpha$  avec  
les fibres

$$(R_c)_x = \frac{(R_c)_1}{\sin^2 \alpha}$$

$$(R_c)_x = \frac{(R_c)_2}{\cos^2 \alpha}$$

$$(R_c)_x = \frac{(\tau_c)_{12}}{\cos \alpha \sin \alpha}$$

**Figure 14.11** Influence de l'angle  $\alpha$  entre la direction de la contrainte de traction  $\sigma_x$  et celle de l'axe des fibres sur le rapport  $(R_c)_x/X_c$ , où  $(R_c)_x$  est la résistance du matériau composite à la traction dans la direction  $x$  et où  $X_c$  représente  $(R_c)_1$ ,  $(R_c)_2$  ou  $(\tau_c)_{12}$ , les résistances du composite dans les directions principales 1 et 2.

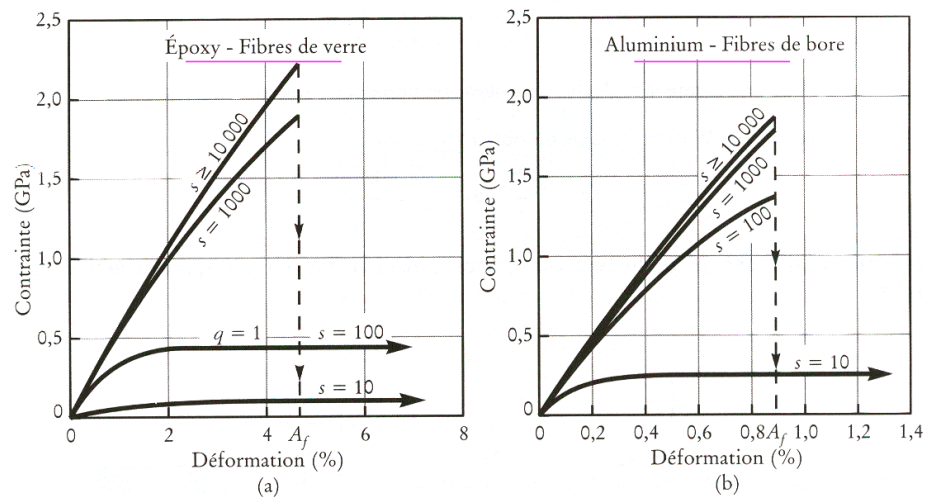
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-33

## Influence du facteur de forme $s$ sur la tenue en traction des composites

$$s = \frac{l}{r}$$

Facteur  
de forme  
de la fibre



**Figure 14.8** Exemples de courbes de traction théoriques d'un matériau composite, selon la valeur du facteur de forme  $s$  des fibres discontinues : a) cas d'un composite «époxy-fibres de verre» E ( $V_f = 0,67$ ,  $\tau = 6$  MPa) ; b) cas d'un composite «aluminium-fibres de bore» ( $V_f = 0,48$ ,  $(R_e)_{Al}/2 = 30$  MPa). (D'après M. R. Piggot, Load-bearing Fibre Composites, Pergamon Press, 1980, p. 67 et 68 ; reproduction autorisée.)

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-34

# Les matrices

---

- Rôles :
  - assurer le transfert des contraintes au composite,
  - incorporer les fibres (*fabrication facile et au faible coût*).
- Caractéristiques :
  - adhérer fortement aux fibres,
  - ne pas être trop rigide.
- Type : matrices organiques :
  - plastiques thermodurcissables : *deviennent permanemment durs lorsque chauffés et refroidis et ne ramolissent plus, même si réchauffés encore.*
  - thermoplastiques : très répandus et peu coûteux :
    - *Chauffés, les thermoplastiques deviennent mous jusqu'à la liquéfaction.*
    - *Refroidis: ils deviennent durs.*
    - *Chauffés et refroidis, ils passent de mous à dur et vis-versa de façon répétée.*

13-35

## Les matrices organiques

---

- Plastiques thermodurcissables : résines
  - Résines de polyester; *renfort fibres de verre : économique et utilisé à T° ambiante.*
  - Résines époxy : *meilleures propriétés meca, mais plus coûteux que les résines de polyester,*  
*T° utilisation = 150 à 200°C.*
  - Résines phénoliques : *bonne tenue à chaud jusqu'à 400°C.*
  - Résines polyimides : *chers mais conservent leurs propriétés jusqu'à 400°C.*
  - Résines mélamines :
    - résistent à l'abrasion,
    - se colorent bien,
    - peu inflammables,
    - bonne propriétés électriques.

*Utilisation :  
Panneaux protecteurs  
ou décoratifs*

13-36



# Les matrices métalliques

- **Avantages :**

- Contribue aux propriétés mécaniques élevées du composite ( $E$ ,  $R_e$ , duct.)
- Bonne résistance à l'attaque par les solvants;
- Gamme de températures d'utilisation vaste;
- Meilleure conductibilité thermique et électrique;
- Facile à assembler : collage, soudage.

- **Inconvénients :**

- Masse volumique élevée;
- Les fibres peuvent réagir avec la matrice à haute température (cas de la silice et de l'aluminium);
- Composites plus difficiles à fabriquer  $\Rightarrow$  coût de production élevé.



*Diamant dans  
une matrice  
métallique :  
outils de coupe*

**Généralement, les  
particules de renfort  
sont dures et abrasives  
(céramique) : Cermet**

13-37

# Matrices métalliques

- **Avantages % aux polymères :**

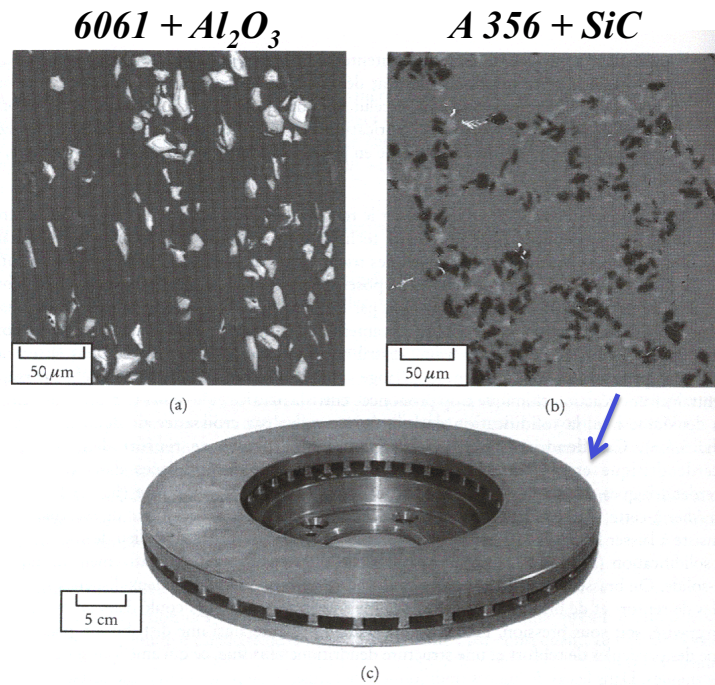
- Meilleures propriétés meca. ( $R_m$  et  $R_e$  des composites élevées);
- Meilleure conductibilité thermique et électrique;
- Facile à assembler : collage, soudage;
- Gamme de température d'utilisation vaste.

- **Inconvénients :**

- Masse volumique élevée;
- Les fibres peuvent réagir avec la matrice à haute température (cas de la silice et de l'aluminium);
- Composites plus difficiles à fabriquer  $\rightarrow$  chers;
- Discontinuité à  $R_e$ ;
- **Fonderie : mouillabilité.**

13-38

## Composites à matrice métallique

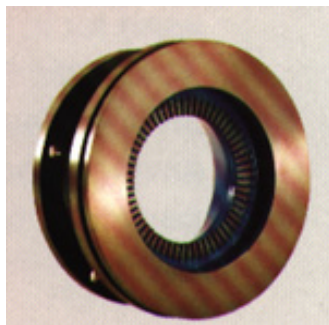


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-39

## Applications des CMM

### Disque de frein



- Réduction de poids
- Bonne résistance à l'usure
- Meilleures propriétés de lubrification
- Ex : Al/SiC

### Chemise de piston



- Expansion thermique réduite
- Bonne résistance à l'usure
- Meilleures propriétés de lubrification
- Poids réduit
- Consommation d'essence réduite
- Ex : Al/SiC

13-40



# Les matrices céramiques

- Avantages :
  - Réfractaires,
  - Rigides,
  - Résistante et bonne stabilité chimique,
  - Amélioration considérable de la ténacité (La ténacité croît avec la fraction volumique  $V_f$ ).
- Fabrication :
  - Extrusion de la matrice (poudres) et des fibres + frittage de l'ensemble.
  - Incorporation des fibres par imprégnation dans la matrice liquide (cas des céramiques vitreuses, des fibres de SiC).

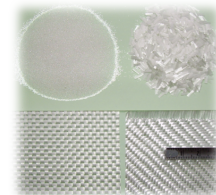


Moteur de fusée Vinci®

13-41

# Matériaux utilisés comme renfort

- Fibres de verre
  - Très haute sensibilité aux rayures :
    - concentration de contraintes,
    - diminution de  $R_m$
  - Fabriqués par extrusion du verre fondu (filière percée de trous de 1 à 2 mm) puis étirage (5 à 15  $\mu\text{m}$  dia).
  - Peu coûteuse : 1 \$/kg
- Fibres de polymères : Aramide = Kelvar®
  - Module d'Young élevé : 60 (Kelvar 29) et 130 GPA (Kelvar 49),
  - Coût élevé : 15 à 20 \$/kg.
- Fibres de carbone
  - Orientation préférentiel des cristaux de graphite // axe des fibres :
    - Rigidité et  $R_m$  élevées,
    - Température d'utilisation élevée :  $> 2000\text{ }^\circ\text{C}$ ; faible  $\alpha$ .
  - Prix abordable et en décroissance : 10 \$/kg.



Fibres de verres



Fibres de kevlar®



Fibres de carbone

13-42

# Propriétés des fibres

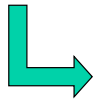
| Caractéristiques                     | Kevlar 29* | Kevlar 49* |
|--------------------------------------|------------|------------|
| Module d'Young (GPa)                 | 60         | 130        |
| Résistance à la traction (MPa)       | 2700       | 3600       |
| Allongement à la rupture (%)         | 4,5        | 2          |
| Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | 1450       | 1450       |
| Température max. d'utilisation (°C)  | 200        | 200        |
| Température de dégradation (°C)      | 400        | 425        |

*Fibres d'aramide  
(Kevlar®)*

*Cout élevé: 15 à 20 \$/kg*

*Utilisation : câbles de renfort en pneumatique en remplacement des fibres d'acier*

*Fibres de carbone*



*Fabriqués en carbonisant les fibres de polymère : oxydation*

| Caractéristiques                     | Fibres à haute résistance | Fibres à haut module |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Module d'Young (GPa)                 | 180 à 230                 | 350 à 420            |
| Résistance à la traction (MPa)       | 2500 à 3400               | 1900 à 2300          |
| Teneur en carbone (%)                | 95 à 98                   | 99                   |
| Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | 1800                      | 1900                 |
| Température max. d'utilisation (°C)  | 2000*                     | 2500*                |

\* Température de 500 °C en atmosphère oxydante ou température limitée par la température maximale de la matrice.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

**13-43**

## Matériaux utilisés comme renfort

- Fibres métalliques :**

- Bore,
- Béryllium (Pb de santé).



*Fibres d'aluminium*

- Fibres en céramique :**

- $Al_2O_3$  : Alumine (oxyde d'aluminium),
- $SiC$  : Carbure de silicium,
- $Si_3N_4$  : Nitrure de silicium,
- $BeO$  : Oxyde de béryllium.



*Fibres céramiques*

- Renfort minéraux :**

- *Amiante (Pb de santé) :*
  - Moins cher,
  - $E = 160 \text{ GPa}$ ,  $R_m \approx 5500 \text{ Mpa}$ ,
  - Bonne résistance thermique.
- *Mica : meilleures propriétés dans les directions de la paillette :*
  - $R_m = 700 \text{ à } 900 \text{ MPa}$ ,  $E = 210 \text{ Gpa}$ .



*Feuilles de mica*

# Propriétés des fibres de renfort

Tableau 14.5 Caractéristiques des fibres métalliques et des fibres de céramique

| Caractéristiques                        | Bore (fibre) | SiC (fibre) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (fibre) | SiC* (trichite) | BeO* (trichite) |
|---|--------------|-------------|--|-----------------|-----------------|
| Module d'Young (GPa)                    | 300 à 420    | 480         | 500                                    | 840             | 720             |
| Résistance à la traction (MPa)          | 3000 à 3700  | 2300        | 2000                                   | 21 000          | 6900            |
| Allongement à la rupture (%)            | 0,7 à 0,9    | 0,5         | 0,4                                    | 2 à 2,5         | 0,8             |
| Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )    | 2650         | 3200        | 4000                                   | 3200            | 3000            |
| Température maximale d'utilisation (°C) | 500 à 700    | 900         | 800                                    | 1600            | 1500            |

\* Données relatives à des trichites parfaites (pas d'imperfection en surface) et de faible diamètre ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ).

**Trichites chers : 1000 \$/kg. Leur fabrication est difficile.**

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-45

# Choix des matrices et des renforts

*Une trop grande différence de  $\alpha$  engendre, lors du chauffage ou du refroidissement, des contraintes thermiques pouvant entraîner la rupture de l'interface matrice-renfort.*

Tableau 14.6 Coefficient de dilatation linéique de quelques constituants des matériaux composites

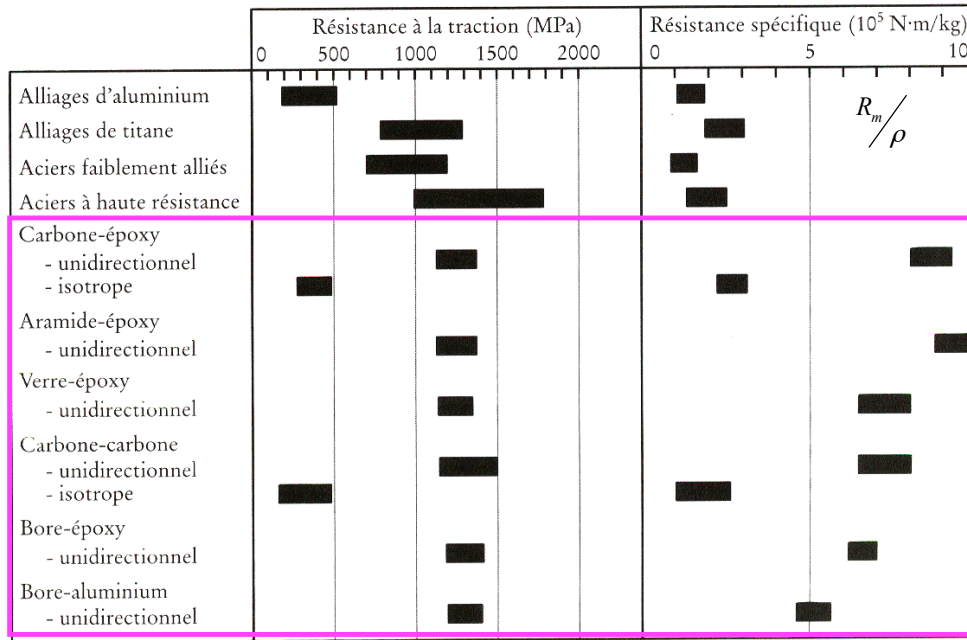
| Matériau            | Coefficient de dilatation ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |
|---------------------|--|
| Aluminium           | 23,9   |
| Béryllium           | 12,4   |
| Bore                | 8,3  |
| Cobalt              | 12,3   |
| Molybdène           | 5,0  |
| Nickel              | 13,3   |
| Tungstène           | 4,3  |
| Alumine             | 6,5  |
| Amiante             | 9,2  |
| Carbone             | 8,0*   |
| Aramide             | 59,0*  |
| Carbure de silicium | 4,8  |
| Verre E             | 15,5   |
| Verre S             | 8,9  |

\* Dans le sens radial de la fibre. Dans le sens axial, ce coefficient est égal, respectivement, à 0,5 et à -2 pour le carbone et l'aramide.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-46

# Propriétés mécaniques de quelques matériaux composites



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

13-47

## Résumé

- Différents types de composites
- Composites à particules
- Composites à fibres
  - Lois des mélanges
  - Effet de la concentration de fibres
  - Effet de la longueur des fibres
  - Effet de l'orientation des fibres
- Divers types de composites
- Choix composite/renfort

13-48